

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY

Katedra fyzické geografie a geoekologie



Vývoj a spektrální projevy odlesnění centrální Šumavy hodnocené
prostřednictvím DPZ a GIS

(Disertační práce)

Martin Hais

Praha, 2008



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně s použitím citované literatury a v rámci uvedeného autorského podílu na publikacích. Práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného akademického titulu.

Praha, březen 2008

Martin Hais

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému školiteli RNDr. Jakobovi Langhammerovi, Ph.D. za trpělivé vedení práce a za všestrannou pomoc.

Dále děkuji RNDr. Tomáši Kučerovi, Ph.D. za ochotnou spolupráci na publikacích, cenné rady, zapůjčení i darování některých literárních podkladů.

Za poskytnutí materiálně-technického zázemí na pracovišti Laboratoře aplikované ekologie (ZF JCU v Českých Budějovicích) děkuji doc. RNDr. Liboru Pecharovi, CSc., za cenné konzultace pak kolegům tohoto pracoviště, zejména Ing. Jakobovi Bromovi a Ing. Janu Procházkovi, Ph.D.

Práce byla podpořena i Výzkumným záměrem Zemědělské Fakulty, JU v Českých Budějovicích MSM 6007665806.

RNDr. Janu Pokornému, CSc. děkuji za pomoc, spoluautorství na publikacích, a konzultace.

Prof. Ing. Josefu Fantovi, CSc. děkuji za odborné konzultace a poskytnutí publikací s lesnickou tematikou.

Mgr. Magdě Jonášové děkuji za spolupráci a cenné konzultace.

RNDr. Martinu Šimovi děkuji za uvedení do problematiky DPZ a cennou pomoc zejména v počátcích práce.

Za užitečné rady v oblasti DPZ děkuji též RNDr. Jiřímu Žaloudíkovi, CSc.

Ing. Luboši Kučerovi děkuji za pomoc při řešení technických problémů se zpracováním družicových dat.

Děkuji zprávě NP Šumava za cenné informace a poskytnutí dat nezbytných pro moji dizertační práci, jmenovitě můj vřelý dík patří zejména Ing. Luboši Dvořákovi, Ph.D. a RNDr. Ivě Bufkové, Ph.D.

Za jazykové korektury děkuji Dr. Keithovi Edwardsovi a MSc. Sarah Wexler.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům a přítelkyni Markétě za pochopení a podporu během mého postgraduálního studia.

Obsah:

Úvod	5
1. Formulování problému	5
2. Hlavní cíle a hypotézy.....	5
Literární rešerše	7
1. Disturbance jako tvůrce krajinných změn.....	7
2. Dálkový průzkum Země a změny v krajině.....	8
3. Výzkum lesních porostů pomocí DPZ.....	9
4. Změny lesních porostů a DPZ.....	11
4.1 Optický DPZ a hodnocení změn lesních porostů.....	12
4.2 Termální DPZ a teplotní charakter lesních porostů.....	16
5. Rozpad lesních porostů v důsledku přemnožení hmyzích škůdců....	19
6. Vývoj rozšíření lýkožrouta v oblasti centrální Šumavy.....	19
7. Obnova lesů v rozpadlých smrčínách a na holých sečích.....	22
Struktura práce	23
Citovaná literatura	26
Kapitola 1: Changes in surface temperature and humidity parameters resulting from spruce forests decay in the centre of the Šumava National Park.....	34
Kapitola 2: Vliv odlesnění a odumírání horských smrčín na teploty krajinného krytu a možné důsledky pro formování odtoku v oblasti centrální Šumavy.....	46
Kapitola 3: The influence of topography on the forest surface temperature received from Landsat TM, ETM+ and ASTER thermal channels.....	60
Kapitola 4: Surface temperature change of spruce forest as a result of bark beetle attack: Remote sensing and GIS approach.....	81
Kapitola 5: Surface temperature changes of spruce forest stands as a result of bark beetle outbreak.....	101
Kapitola 6: The multitemporal comparison of two types of forest disturbance using Landsat TM/ETM+ and field vegetation data.....	112
Souhrnná diskuse	134
Závěr	138
Citovaná literatura	138

ÚVOD

1. Formulování problému

Během posledních dvaceti let došlo k výraznému odlesnění centrální Šumavy vlivem přemnožení lýkožrouta smrkového, ale i sanacemi lesních porostů proti jeho dalšímu šíření. Toto odlesnění spadá do oblastí NP Šumava (Česká republika) a NP Bavorský les (Německo), kde je v současné době více než 6 000 ha rozpadlých smrčín a holých sečí. Takto rozsáhlá změna krajinného krytu může mít celou řadu důsledků pro změnu místního klimatu, srážko-odtokový režim, erozi půdy, degradaci biodiverzity apod. Proto je důležité studium jejího rozsahu i dynamiky.

V posledním desetiletí se vedou četné diskuse na téma přístupu k lesním porostům v oblastech s různým statutem ochrany přírody, v tomto případě v národních parcích. V této souvislosti se nabízí celá řada otázek. Tato práce se týká zejména otázky: jaký je projev a možné důsledky odlesnění na velké ploše? Další řešenou otázkou je, zda a jak se bude lišit charakter holých sečí a rozpadlých smrčín a jaké jsou jejich podmínky z hlediska funkcí krajiny a regenerace lesa. Důležitý je v tomto smyslu i popis dynamiky vývoje odlesnění a následné regenerace.

Tato disertační práce vychází převážně z metod dálkového průzkumu Země (DPZ), přičemž hlavní část datových vstupů je tvořena družicovými daty. DPZ představuje zcela unikátní metodu pro hodnocení disturbancí lesních porostů díky takovým atributům vybraných družicových dat, jako jsou velkoplošný, multispektrální a multitemporální datový záznam.

2. Hlavní cíle a hypotézy:

Hlavním cílem práce je **zhodnotit změnu charakteru krajinného krytu v důsledku odlesnění v oblasti centrální Šumavy pomocí metod DPZ**. Tento obecný cíl byl rozčleněn do těchto dílčích cílů:

- A) Detekce rozpadlých smrčín a holých sečí zpracováním družicových dat a interpretace těchto změn ve viditelném, blízkém, středním IČ a termálním pásmu. Identifikace odlesněných ploch pomocí různých spektrálních pásem má sloužit nejen k vymezení rozsahu těchto změn, ale data pořízená v různých spektrálních

pásmech, případně jejich kombinace, vypovídají o biofyzikálních vlastnostech povrchů. Tím je možné hodnotit i důsledky odlesnění.

Hypotéza: spektrální indexy běžně používané k hodnocení lesních disturbancí mohou spolehlivě popsat různé typy odlesnění.

Hypotéza: pomocí termálních družicových dat středního prostorového rozlišení je možné identifikovat změnu (zvýšení) teplot v důsledku odlesnění nebo ekofyziologických změn lesních porostů. V letních měsících se budou odlesněné plochy projevovat vyššími hodnotami teplot krajinného krytu.

- B) Srovnání spektrálního projevu rozpadlých smrčín a holých sečí. Tento cíl směřuje ke zjištění, zda mají oba typy hodnocených ploch rozdílný spektrální projev a pokud ano, pokusit se tento rozdíl kvantifikovat.

Hypotéza: Spektrální projev rozpadlých smrčín a holých sečí se bude lišit.

Hypotéza: Teplotní režim obou porovnávaných ploch se bude lišit. U holých sečí lze předpokládat vyšší hodnoty teplot krajinného krytu během letních dnů s radiačním počasím.

- C) Popis dynamiky vývoje spektrálních změn rozpadu smrčín a holých sečí a jejich srovnání. Srovnání spektrálního charakteru obou hodnocených ploch v čase umožňuje nejen srovnání rozdílů, ale i délky trvání disturbance lesa. Proto je popis dynamiky důležitý i pro porovnání, který typ ploch umožňuje rychlejší a úspěšnější regeneraci lesa.

Hypotéza: Multitemporální analýza družicových dat umožňuje popsat časový průběh změn pomocí spektrálních rozdílů.

Hypotéza: Rozdíl spektrálního projevu rozpadlých smrčín oproti živým smrčínám bude menší než v případě holých sečí.

Hypotéza: Změna spektrálního projevu v případě rozpadlých smrčín by měla mít pozvolnější průběh na rozdíl od holých sečí, kde je předpokládána velká dynamika změny.

LITERÁRNÍ REŠERŠE

1. *Disturbance jako tvůrce krajinných změn*

Krajinu je nutné chápat jako velmi dynamický systém, který prodělává vlivem přírodních (endogenních a exogenních) a antropogenních faktorů řadu změn, zároveň však tyto faktory zpětně ovlivňuje. Dynamika krajiny je tak ovlivňována komplexem biotických a abiotických interakcí vedoucích ke změnám ve struktuře a funkci ekologických systémů (Forman a Godron, 1986). Základní důvody krajinných změn popisují Lambin a Strahler (1994): dlouhodobé změny klimatu, geomorfologické a ekologické procesy (např. eroze, sukcese vegetace), antropogenní změny vegetačního krytu (např. odlesnění, degradace půdy), sezónní klimatická variabilita a vliv změn skleníkového efektu. Při hodnocení krajinných změn jde zejména o tři základní aspekty (MacLeond & Congalton, 1998): identifikace změny, určení její podstaty a hodnocení prostorové struktury změny.

Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících dynamiku krajiny jsou disturbance. Za disturbance lze obecně považovat fyzikální sílu, proces nebo událost, která způsobí náhlou změnu v chování nebo ve vlastnostech systému (Rykiel et al., 1988). Důležité je však rozlišovat mezi příčinou disturbance a jejím následkem (Pickett & White, 1985). Obecně je disturbance rozuměna příčina a nikoliv následek. Základní rozdělení disturbance a jejich charakteristiky uvádí Rykiel et al. (1988). V případě lesních porostů definují Waring & Running (1998) disturbance jako jakýkoliv faktor, který způsobuje významnou redukci indexu listové plochy (LAI - leaf area index) po období delší než jeden rok. Pokles listové plochy, neboli defoliace, je způsobena vlivem celé řady faktorů (hmyz, patogenní houby, atmosférická depozice apod.); zvláštní skupinou je těžba nebo asanace lesních porostů, kdy dochází zcela nebo z větší části k odvozu vykácených dřevin. Ve vztahu k přirozené obnově lesa je možné chápat disturbance jako proces odumírání stromů, při kterém se uvolňuje prostor pro přirozenou obnovu lesa (Oliver & Larson, 1996).

Disturbance lesních porostů jsou výraznou krajinnou změnou, která má v závislosti na plošném rozsahu a jejím typu celou řadu důsledků: 1) ovlivnění hydrologického režimu,

odnosu látek a eroze (Uunila et al., 2006), 2) ovlivnění místního klimatu (Geiger, 1965; Petřík a kol., 1986), 3) ovlivnění koloběhu uhlíku (Houghton, 1993), a 4) v neposlední řadě jde i o změnu krajinného rázu (Löw & Michal, 2003).

2. Dálkový průzkum Země a změny v krajině

Protože hodnocení disturbancí lesních porostů v této práci je založeno zejména na metodách DPZ, považuji za přínosné zmínit i některé obecné vlastnosti těchto metod, které dokládají jejich unikátnost i šíři využití.

Dálkový průzkum Země (DPZ) znamená v širším pojetí soubor metod, které umožňují zkoumat daný objekt bez přímého kontaktu (Jensen, 2000). V užším slova smyslu je však DPZ považován za pořizování dat pomocí letadel, balónů a družicových systémů a jejich následné zpracování a interpretace (Dobrovolný, 1998). Pro družicové scény, letecké snímky apod., se často používá obecný název distanční data (Dobrovolný, 1998).

Protože s postupující globalizací a integrovaností světa vyvstává potřeba získávat prostorové informace, a to pro rozsáhlá území, v dostatečně krátké době a za co nejnižších nákladů, stává se DPZ mnohdy neodmyslitelnou součástí celé řady oborů lidské činnosti (Jensen, 2000, Lillesand et al., 2004). DPZ prodělává v současné době velmi dynamický rozvoj. Svědčí o tom i obrovské množství družicových systémů, které byly v posledních létech vypuštěny na oběžnou dráhu (<http://www.eurimage.com/>).

Dálkový průzkum Země postupně pronikl do nejrůznějších oborů lidské činnosti a je dnes přirozenou součástí telekomunikačních technologií, sledování počasí, navigace, ale i hodnocení přírodních katastrof a jejich předpovědí. Jednou z důležitých vlastností DPZ je poskytování dat v různém intervalu elektromagnetického záření a v pravidelné a prostorově vázané struktuře rastrových dat. Přitom rozšíření družicových systémů vedlo k jejich diverzifikaci podle jejich rozdílného využití (Asrar, 1989).

Dnešní družicové systémy tak postihují na jedné straně lokální úroveň snímání, která je zaměřena na prostorově přesný záznam a přes regionální úroveň až po globální úroveň na straně druhé, jejíž doménou je naopak postižení širšího kontextu stavů a procesů na úrovni celé Země. V případě záznamu distančních dat je důležitý fakt, že zájmové území je až na výjimky pokryto celé v pravidelném gridu datového záznamu. Tím odpadají problémy s řešením metod interpolace nutné při lokálních datových záznamech. Další výhodou je u mnoha družicových dat i systematický záznam zemského povrchu. To znamená, že družicové systémy středního a malého prostorového rozlišení zpravidla snímají zemský

povrch (často kromě oceánů, nebo zemských pólů) v pravidelném časovém intervalu (Lillesand et al. 2004). To má velký význam pro hodnocení nepředpokládaných změn ať již přírodního, nebo antropogenního charakteru. Při takovém hodnocení, zvláště při kvantifikaci jevu je nezbytné mít k dispozici data před hodnocenou událostí. Protože mnoho družicových systémů pořizuje dlouhodobý datový záznam v pravidelném intervalu (např. systém Landsat), je možné jej získávat z datových archivů. Proto je DPZ unikátním nástrojem, který takovéto temporální analýzy umožňuje.

I přes obrovský rozvoj a dnešní vysokou úroveň metod DPZ je pravděpodobné, že informační potenciál distančních dat nebyl ještě zdaleka využit. Jedním z oborů, ve kterém má DPZ nezastupitelné místo, je hodnocení změn v krajině v důsledku antropogenní činnosti i působení přírodních faktorů. Jedním z obecných cílů této práce je prohloubení poznatků v této oblasti se snahou využít nové přístupy i zdokonalení standardně používaných metod.

3. Výzkum lesních porostů pomocí DPZ

Dálkový průzkum Země je zcela unikátní metodou pro hodnocení změn lesních porostů (Coppin & Bauer, 1996; Franklin, 2001; Wulder & Franklin, 2003; Wulder & Franklin, 2007). Již zmíněná schopnost datového záznamu velkých ploch v pravidelném gridu má velký význam při hodnocení stavu lesních porostů, kde je pozemní průzkum technicky náročný a extrapolace dat na celé lesní porosty může významně snižovat přesnost výsledku (Running et al., 1986). S rozvojem metod DPZ a se vzrůstajícím počtem dat s různým prostorovým, spektrálním, temporálním a radiometrickým rozlišením vzrůstal postupně i potenciál pro hodnocení lesních ekosystémů (Wulder & Franklin, 2007). Pomocí distančních dat tak lze hodnotit celou řadu charakteristik lesa, jakými jsou: plocha zalesnění a její změny v čase (Khorram et al., 1994), identifikace ploch holých sečí (Hall et al., 1989; Cohen et al., 2001), požárů (Pozo et al., 1997) a ploch po požárech (Fraser et al., 2000), identifikace porostů napadených hmyzími škůdci (Muchoney & Haack, 1994; Franklin et al., 1995, Wulder et al., 2006a, Wulder et al., 2006b), změny zdravotního stavu lesa vlivem znečištění ovzduší (Rock et al., 1985), hodnocení prostorové struktury lesních porostů (Bressee et al., 2004) a věkových kategorií (Cohen et al., 1995; Hansen et al., 2001), klasifikace lesních porostů (kategorie: listnatý les, jehličnatý, smíšený les) (Franklin et al., 2003), odhady biomasy (Ardö, 1992), zapojení porostů (Butera, 1986) apod.

První studie lesních porostů pomocí DPZ připadají na třicátá léta dvacátého století a byly založeny na zpracování leteckých snímků (Coppin & Bauer, 1996). Tyto úlohy byly často spojeny s mapováním celého krajinného krytu a v případě lesů se jednalo o stanovení ploch lesních porostů, pasek, případně následků škod po vichřicích apod. K těmto účelům se letecké snímkování používá dodnes (Hall et al., 2007). Kromě kvantitativních ukazatelů se brzy začalo využívat i jiných spektrálních pásem pro hodnocení kvalitativních změn, jako je například identifikace porostů se sníženým zdravotním stavem lesa v blízkém infračerveném spektru (Leckie & Gougeon, 1981). Dalším zlomovým okamžikem bylo vypuštění první civilní multispektrální družice v roce 1972, kterou byl Landsat 1, původně označovaný jako ERTS 1. Tím se odstartovala éra hodnocení lesních porostů na velkých plochách s využitím kromě viditelného spektra též blízkého a středního IČ pásma (Iverson et al., 1989; Goward & Williams, 1997). Tato data jsou dodnes používána v multitemporálních studiích vývoje změn lesních porostů. Nicméně první využití družicových dat směřovalo k mapování lesních typů (Iverson et al., 1989).

Při hodnocení lesních ekosystémů je klíčový výběr vhodných družicových dat. Jensen (2000) uvádí čtyři základní charakteristiky: prostorové, spektrální, radiometrické a temporální rozlišení.

Prostorové rozlišení je velmi důležitým kritériem při hodnocení lesních ekosystémů pomocí distančních dat (Linke et al., 2007). To je dáno nejmenším segmentem obrazu, který je nazýván pixel. Podle prostorového rozlišení pak rozlišujeme data: velmi vysokého, středního (někdy též vysokého) a malého rozlišení. Pomocí dat s velmi vysokým rozlišením (řádově desítky centimetrů) lze tak lokalizovat a hodnotit spektrální vlastnosti jednotlivých stromů (Malenovský, 2006), data středního prostorového rozlišení (přibližně 10-100 m) jsou využívána k hodnocení jednotlivých porostů (Cohen et al., 2002) a data malého prostorového rozlišení (okolo 1 km) jsou nástrojem k výzkumu změn globálního charakteru (Shvidenko & Apps, 2006).

Dalším důležitým parametrem distančních dat je spektrální rozlišení, které určuje počet pásem a šířku jejich intervalu. Podle počtu spektrálních kanálů rozlišujeme data panchromatická (jedno pásmo zabírá většinou široký rozsah spektra, např. celou oblast viditelného spektra), multispektrální (několik spektrálních pásem), hyperspektrální (vysoký počet pásem o šířce obvykle několik nm; např. Hyperion 220 pásem). Podle rozsahu spektrálních pásem rozděluje Asrar (1989) datový záznam a následně i příslušný obor DPZ: optický (zahrnuje viditelné záření 0,4 – 0,7 μm , blízké IČ 0,7 – 1,5 μm a střední IČ 1,5 – 3 μm) termální (3 μm – 1 mm) a mikrovlnný DPZ (1 mm – 1 m). Využití optického a

termálního DPZ pro hodnocení lesního porostů bude popsáno v dalších kapitolách. Zcela zvláštní metodické přístupy zahrnuje hodnocení lesních porostů pomocí dat v mikrovlnné části spektra (Stone & Woodwell, 1988).

Radiometrické rozlišení udává škálu hodnot, kterých může každý jednotlivý pixel nabývat (Jensen, 2000). Kromě „klasických“ 8-bitových dat (256 hodnot) tak může datový záznam nabývat v případě 32-bitových dat více než 4 mld. hodnot. Tím se výrazně zvyšuje citlivost dat k nepatrným rozdílům v rámci lesního porostu.

Temporální rozlišení je dáno časovým intervalem mezi snímáním stejného místa na zemském povrchu. Přestože temporální rozlišení je vzhledem k dynamice změn lesních porostů poměrně vysoké (např. u družice Landsat 16 dní), může být přesto limitujícím faktorem. Například pokud je zapotřebí srovnávat porosty ve stejné fenofázi mezi jednotlivými roky. Situaci navíc komplikuje stav oblačnosti, která může datový záznam učinit nepoužitelným. Navíc v případě sledování některých velice dynamických jevů (např. lesní požáry) je využitelnost distančních dat podmíněna právě temporálním rozlišením.

Všechny čtyři výše zmíněné parametry družicových dat jsou navzájem velmi provázány. Z důvodů omezené kapacity přenosu, ukládání dat a dalších technických parametrů družicového snímání není možné pořizovat družicová data, která dosahují nejlepších parametrů ve všech čtyřech zmíněných charakteristikách současně. Proto je nutné volit data podle účelu použití (Jensen, 2000).

4. Změny lesních porostů a DPZ

Hodnocení temporálních změn lesních porostů má velký význam pro pochopení rozsahu nebo intenzity zkoumaných procesů. Aby bylo možné takové změny hodnotit pomocí distančních dat, je důležité splnit dva základní předpoklady (Coppin & Bauer, 1996):

- 1) daná změna se projeví v elektromagnetické radiaci. Změna porostu musí převážit nad vlivem proměnlivých atmosférických podmínek, rozdílného osvětlení a zastínění a v neposlední řadě i nad projevem pozadí (vliv povrchu půdy, bylinného patra apod.).
- 2) změna v odrazivosti a vyzařování elektromagnetické energie v čase je projevem biofyzikálních změn v porostu.

Pro dobrý výsledek hodnocení změn lesních porostů je důležitý výběr vhodných dat, ale i období jejich pořízení. Podrobný seznam metod pro hodnocení změn lesních porostů pomocí DPZ uvádějí Coppin a Bauer (1996). V případě detekce změn je možné vycházet z technik, které využívají data pořízená před změnou a data snímaná po proběhnutí změny, nebo zachycující její určitou fázi. Pro popis dynamiky změn je však nutné využít multitemporálního srovnání (Collins & Woodcock, 1996; Cohen et al., 2002; Kennedy et al., 2007). Obecně je důležité u multitemporálních analýz zvolit takový časový krok, který umožňuje správně interpolovat průběh dané změny. Zvláštním typem multitemporálního srovnání je srovnání změn datového záznamu vždy k počátečnímu datu. Míra hodnocené změny je tak závislá na časové vzdálenosti od počátku sledování (Wilson & Sader, 2002; Jin & Sader, 2005).

K hodnocení změn lesních porostů jsem v této práci využil dvou metodických přístupů: optického a termálního DPZ. Toto rozdělení odráží jak specifické projevy elektromagnetického záření v daných vlnových délkách, tak odlišné metody zpracování dat (Asrar, 1989). Podle zmíněného členění bude následující text členěn do dvou samostatných tématických bloků.

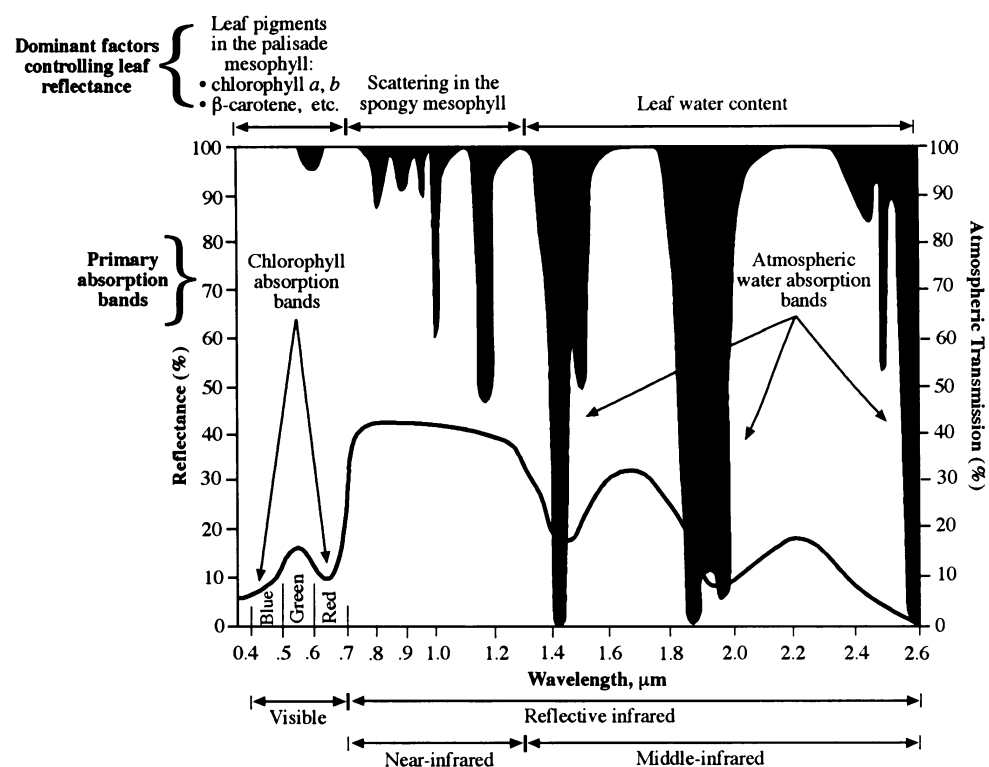
4.1 Optický DPZ a hodnocení změn lesních porostů

Optický DPZ operuje zejména se zářením odraženým od zemského povrchu. To platí pro oblast viditelného záření, v IČ oblasti spektra a dále směrem k delším vlnovým délkám se postupně uplatňuje i záření emitované (Jensen, 2000).

Vegetace má velice specifický spektrální projev (obr. 1), kdy průběh reflektance v jednotlivých spektrálních pásmech vytváří charakteristickou křivku – spektrální signaturu (Jensen, 2000). V modré a zejména červené části viditelného spektra je u zelených rostlin reflektance nejnižší vlivem absorpce záření fotosyntetizujícími pigmenty. Naopak maximální odrazivost ve viditelném spektru připadá na vlnové délky v zelené části. Proto se rostliny projevují zelenou barvou.

V oblasti blízkého IČ spektra mají fotosyntetizující části rostlin nejvyšší reflektanci, což je adaptace zabraňující jejich nadměrnému přehřívání (Jensen, 2000). Vysoká reflektance v oblasti blízkého IČ spektra je tedy projevem zdravé vegetace a označuje se jako „red edge“. Její sklon a pozice pozitivně koreluje s koncentrací chlorofylu, je však také závislá na stáří porostu a na jeho fenofázi (Horler et al., 1983). Na druhé straně změna odrazivosti ve viditelném, ale zejména v blízkém IČ spektru může indikovat změnu zdravotního stavu

vegetace. Těchto poznatků se začalo využívat při hodnocení lesních porostů pomocí dálkového průzkumu Země.



Obr. 1 Spektrální signatura vegetace a hlavní faktory, které ovlivňují její výslednou podobu. (Převzato z Jensen (2000)).

Leckie a Gougeon (1981) zjistili z leteckých dat multispektrálního skeneru, že v oblasti blízkého IČ spektra dochází v souvislosti s defoliací ke snížení reflektance lesa. Kromě blízkého infračerveného spektra dochází se zhoršením zdravotního stavu lesních porostů též k poklesu ve středním IČ spektru. Spektrální rozdíly poškozeného lesa jsou způsobeny v případě defoliace tím, že se spektrálně více začíná projevovat kůra stromů a přízemní patro. Kůra stromů má větší reflektanci než listy nebo jehlice ve viditelném a středním IČ, v blízkém IČ je to naopak (Guyot & Riom, 1988). Stejně tak přízemní patro má v létě větší reflektanci ve viditelném a středním IČ, neboť je v letním období tvořeno převážně suchou travou. Protože v blízkém IČ je menší reflektance kůry, ale reflektance podrostu je vyšší, tyto vlivy se vyrušují a tak samotné blízké IČ spektrum je méně vhodné pro hodnocení změn zdravotního stavu porostů, která se projevuje defoliací. Reflektance ve středním IČ je v případě smrkových porostů nepřímo úměrná množství biomasy (Ardö, 1992), zapojenosti korun (Butera, 1986) a hustotě biomasy (Horler & Ahern, 1986). Proto se reflektance

v tomto spektru v důsledku defoliace zvyšuje. Reflektance mladších porostů je vyšší v důsledku jejich menší hustoty (Horler & Ahern, 1986, Guyot & Riou, 1988).

Rock et al. (1985) navrhli MSI (moisture stress index), který vyjadřuje podíl hodnot kanálů ve středním IČ a v blízkém IČ spektru (TM5/TM4 v případě družice Landsat TM). Tento spektrální index vykazuje významnou korelaci s poškozením lesa. Tuto korelaci potvrdil i následující výzkum dávající do souvislosti zdravotní stav lesa zjištěný z pozemního měření s distančními daty pořízenými ze skenerů na leteckých nosičích a z družicového záznamu (Rock et al., 1986). Dále následovala celá řada prací, využívajících různé spektrální indexy, zejména blízkého a středního infračerveného spektra. Seznam těchto indexů uvádějí Lambert et al. (1995). Lambert et al. (1995) dále uvádějí, že v případě družice Landsat TM vyhovují pro odlišení nejmenšího a největšího poškození lesa nejlépe indexy: $5/4$, $7/4$, $(4-7)/(4+7)$, $4/(4+5+7)$ a $5/(4+5+7)$. Přesnost tohoto odlišení dosahuje 80 – 90 %. Naopak hojně využívaný index NDVI považuje tento autor pro rozlišení stupně poškození lesních porostů jako nevhodný. Stejný početní princip jako je v případě NDVI použili Hardisky et al. (1983), s tím rozdílem, že využívá hodnoty reflektance v blízkém a středním IČ záření. Tento index se označuje NDII (normalized difference infrared index):

$$NDII = (\rho_{819} - \rho_{1649}) / (\rho_{819} + \rho_{1649})$$

Kde ρ je reflektance v dané vlnové délce. Tento index se stal základem pro NDWI (normalized difference water index; Gao, 1996):

$$NDWI = (\rho_{857} - \rho_{1241}) / (\rho_{857} + \rho_{1241})$$

Stejný princip je použit i u indexu NDMI (normalized difference moisture index; Jin & Sader, 2005) s tím rozdílem, že byl použit pro pásma družice Landsat TM:

$$NDMI = (TM4 - TM5) / (TM4 + TM5)$$

Tento index vykazuje oproti NDVI menší citlivost k fenofázím vegetace je tak více použitelný pro srovnání dat z různých období v průběhu roku a rovněž je citlivý na vlhkost

(Jin & Sader, 2005). V hodnocení změn lesních porostů je index NDMI používán pro detekci holých sečí (Jin & Sader, 2005; Healey et al., 2006).

Lineární transformace Tasseled Cap

Lineární transformace Tasseled Cap je velmi často používanou metodou pro hodnocení disturbancí lesa (Kuzera et al., 2005; Jin & Sader, 2005). Tato transformace je založena na principu Analýzy hlavních komponent, přičemž neslouží jen k redukci objemu dat, ale jednotlivé komponenty mohou vyjadřovat vybrané fyzikální parametry krajinného krytu (Kauth & Thomas, 1976; Crist & Cicone, 1984). Transformace se v případě družice Landsat TM nebo ETM+ vypočítá ze šesti spektrálních pásem (tj. ze všech kromě šestého pásma) a výsledkem jsou tři komponenty: Brightness (zářivost – nejvyšší hodnoty dosahují plochy s nejvyšší odrazivostí), Greenness (zelenost – přibližně koreluje s hustotou biomasy a s vitalitou zelených rostlin), Wetness (vlhkost – hodnoty vzrůstají s vlhkostí krajinného krytu). Tato komponenta vykazuje vysokou korelaci s výše zmíněným indexem NDMI (Jin & Sader, 2005), což je dáno tím, že vychází z podobného principu, který je v tomto případě založen na kontrastu viditelných pásem, blízkého IČ družice Landsat TM/ETM+ (1-4) a pásem středního IČ (5 a 7). Pro hodnocení lesních disturbancí (zejména pro detekci holých sečí) je využívána nejčastěji právě tato třetí komponenta Wetness (Wulder et al., 2004; Jin & Sader, 2005). Wulder et al. (2006b) využili index Wetnes pro hodnocení lesních porostů napadených hmyzími škůdci. Z výsledků, ke kterým dospěli Kuzera et al., (2005) však vyplývá, že i zbývající dvě komponenty Brightness a Greenness jsou vhodné pro detekci lesních disturbancí. To dokládají i Wulder et al. (2004), který využil pro určení doby vzniku holých sečí a zároveň věkových kategorií regenerujícího lesa všech tří věkových kategorií. Nicméně index Wetness vykazoval pro tyto účely nejvyšší hodnoty vysvětlené variability (cca 60 %).

Originálním přístupem je využití všech tří výše zmíněných komponent pro výpočet Disturbančního indexu (DI) (Healey et al., 2005; Masek, 2005):

$$DI = \text{Brightness} - (\text{Greenness} + \text{Wetness})$$

Index vychází ze spektrálního projevu odlesněných ploch, které se vyznačují vysokými hodnotami komponenty Brightness a naopak nízkými hodnotami Greenness a Wetness. Výpočet disturbančního indexu pak činí spektrální projev více kontrastním oproti lesním porostům (Healey et al., 2005; Healey et al., 2006).

Kromě hodnocení disturbancí má transformace Tasseled Cap potenciál pro hodnocení strukturní komplexity a klasifikaci věkových tříd lesních porostů (Hansen et al., 2001).

Přestože byla transformace Tasseled Cap byla navržena a dodnes je nejvíce využívána pro data družicového systému Landsat, její vysoká využitelnost způsobila, že podobným způsobem byla vypočítána i pro jiná družicová multispektrální data. Tak byla použita pro data družicových systémů IKONOS (Horne, 2003) nebo Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Lobser & Cohen, 2007).

4.2 Termální DPZ a teplotní charakter lesních porostů

Termální DPZ je důležitým nástrojem k pochopení energetických procesů v krajině (Quattrochi & Luvall, 1999; Quattrochi & Luvall, 2004). Jeho principem je detekce emitovaného dlouhovlnného (termálního) IČ záření. Tím je možné zjistit radiační teplotu objektu. Kinetickou teplotu pak lze vypočítat na základě Stephan-Boltzmanova zákona, který popisuje vztah mezi vyzařováním objektu a jeho teplotou (Jensen, 2000). Tímto principem je možné získávat data teplot krajinného krytu.

Teploty krajinného krytu jsou určovány 1) energetickou bilancí povrchů, 2) podpovrchovými médii, 3) termálními vlastnostmi povrchů a 4) aktuálním stavem atmosféry (počasím); následně pak ovlivňují fyzikální, chemické a biologické procesy na zemském povrchu (Becker & Li, 1990; Campbell, 2002). Teploty krajinného krytu tak představují integrální hodnotu, která může vypovídat o vlastnostech krajinného krytu.

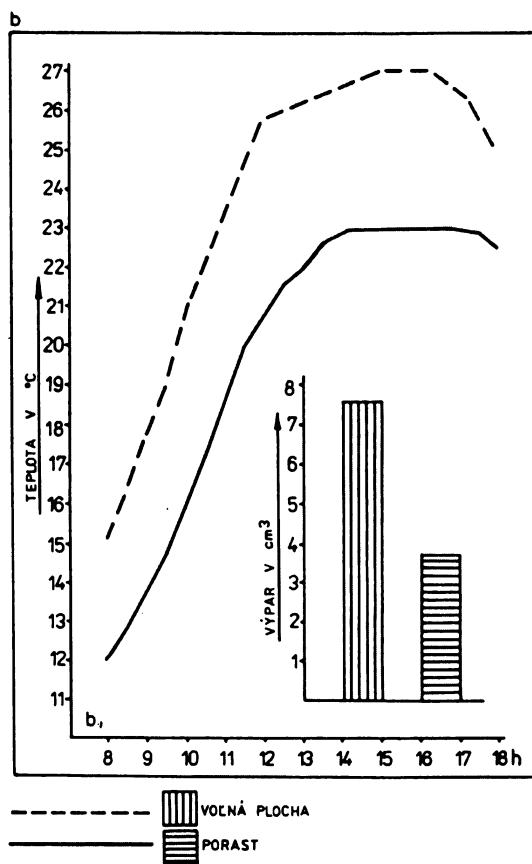
Na energetickou bilanci objektů na zemském povrchu má zásadní vliv množství dopadajícího záření. V závislosti na azimutu a zenitovém úhlu Slunce tak dopadá odlišné množství záření na různě orientované plochy zemského povrchu ve smyslu jejich sklonu a orientace (Geiger, 1965; Yoshino, 1975; Barry, 1992; Geiger et al., 2003, Pierce et al., 2005). Toto však platí pro radiační typ počasí během dne, naopak v noci se více uplatňuje vliv nadmořské výšky (Geiger, 1965).

Jednou z důležitých vlastností, které ovlivňují výslednou teplotu objektů na zemském povrchu, je emisivita. Ta udává, jaký podíl dopadajícího slunečního záření je pohlcen a emitován v podobě záření dlouhovlnného. Důsledkem toho je, že objekty světlé nebo hladké mají nižší teplotu (Jensen, 2000).

Další důležitou vlastností je obsah vody. U substrátů obsahujících vodu (např. vlhká půda) dochází při evaporaci ke spotřebovávání energie na změnu skupenství vody. Tím se mění podíl zjevného tepla ve prospěch tepla latentního, který je dán Bowenovým poměrem. Proto se vlhké povrchy přehřívají méně. Díky schopnosti transpirace

vegetačního krytu se rovněž zvyšuje podíl latentního tepla. Hodnoty celkového výparu z krajinných povrchů (evapotranspirace) se prostřednictvím vegetačního krytu zvyšují a dochází tak k přenosu energie i na jiná místa v prostoru. Tento proces se nazývá disipace sluneční energie a v praxi to znamená, že se zvyšující se hodnotou evapotranspirace dochází k menšímu přehřívání povrchů během jasných slunečních dnů (Pokorný, 2001). Proto je teplota krajinného krytu „indikátorem“ evapotranspirace a následně i disipace sluneční energie.

Při hodnocení lesních porostů pomocí termálního DPZ je nutné mít na paměti některá specifika, kterými se lesy odlišují od ostatních složek krajinného krytu. Snímaná radiální teplota vyjadřuje zejména vlastnosti povrchu korun. Korunové patro tvoří vrstvu, která pohlcuje i odráží značné množství dopadajícího slunečního záření a tak se na povrch půdy dostává jen určitý podíl záření (Petřík a kol., 1986). Tím se prostředí uvnitř lesního porostu ohřívá méně než volné plochy (obr. 2).



Obr. 2. Teplotní rozdíly na holých sečích a v jehličnatém lesním porostu. Převzato podle Petřík a kol. (1986).



V závislosti na zapojenosti porostu zde však dochází i k výměně energie mezi vzduchovými hmotami nad korunami a pod nimi. Vzduchové hmoty podkorunového patra tak mohou ochlazovat prostředí korun. Díky tomu se i povrchy korun ohřívají během dne za radiálního počasí méně, než by tomu bylo v případě holých sečí. Proto je vnitřní mikroklima lesa stabilnější v cirkadiálním chodu teplot (Geiger, 1965; Petřík a kol., 1986).

Dalším specifickým povrhu korunového patra je jeho značná heterogenita. Ta se projevuje značnou horizontální i výškovou členitostí. Při velkých horizontálních i výškových rozdílech mezi jednotlivými stromy vzniká v závislosti na výšce Slunce nad obzorem velké množství zastíněných ploch, které mají vliv na teplotní projev lesa (Bosveld et al., 1999). Vliv členitosti korunového patra se také uplatňuje tím, že záření dopadá na relativně větší plochu, čímž je výsledná teplota porostu nižší (Petřík a kol., 1986).

Podobně jako již popsaná výměna vzduchových hmot v korunovém patře, probíhají výměny vzduchových hmot na okrajích lesa. Takový jev se označuje jako okrajový efekt a projevuje se v této zóně odlišnou energetickou bilancí (Saunders et al., 1999; Geiger et al. 2003; Klassen et al. 2002). Okrajový efekt bude záviset na tom, zda se jedná o zapojený, plynule se snižující porost se solitérními stromy nebo o otevřenou porostní stěnu. V druhém případě bude mnohem výraznější okrajový efekt a šířka této zóny bude větší.

Na okrajový efekt bude mít rovněž vliv jeho orientace: na jižních okrajích (zejména u otevřených porostních stěn) bude záření pronikat přímo do porostu, zatímco okraje se severní expozicí budou vytvářet stíny na volných plochách (Petřík a kol., 1986).

Využití termálního DPZ pro hodnocení lesních porostů zahrnuje celou řadu úloh. Jejich podrobný seznam uvádějí Quattrochi a Luvall (1999). Studií, která se zabývá podobným problémem jako tato disertační práce, jsou teplotní změny krajinného krytu v důsledku odlesnění, které popisují Hashimoto a Suzuki (2004). Waring a Running (1998) popisují korelaci mezi teplotami povrchu lesních porostů a spektrálními vegetačními indexy z družicových dat.

Přes poměrně velký potenciál termálního DPZ pro výzkum lesních porostů, je však zatím využíván (např. v porovnání s optickým DPZ) poměrně málo.

5. Rozpad lesních porostů v důsledku přemnožení hmyzích škůdců

Rozpad smrkových porostů vlivem lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) je jedním ze dvou typů disturbancí hodnocených v této práci. Proto považuji za vhodné stručně zmínit i základní mechanismus tohoto procesu, neboť je nutné jej brát v úvahu pro správnou interpretaci výsledků zpracování družicových dat.

Samice kůrovců vyhledávají odumřelé nebo oslabené stromy na základě terpenů, které jsou produkovány se vzrůstající teplotou (Christiansen et al., 1987). Proto kůrovci preferují lesní porosty s nejvyšším radičním úhrnem na svazích s jižní a jihovýchodní expozicí (Netherer & Nopp-Mayr, 2005). Teplota hraje roli i v letové aktivitě lýkožroutů. Minimální teplota pro výlet je 16 °C, optimum je 22 – 26 °C (Funke & Petershagen, 1994). Další stimulační chemickou látkou jsou feromony vylučované jedinci téhož druhu. Díky agregačním feromonům dochází v porostu ke vzniku ohnisek napadených stromů, která se v případě kalamitního přemnožení dále scelují. Vzdálenost, na kterou lýkožrout migruje, je většinou do 1 km, může být však i vyšší. Obecně se však předpokládá, že ve vzdálenosti vyšší než 8 km již nemůže generace kůrovců v daném roce založit nové ohnisko výskytu (Skuhravý, 2002). Kůrovec ukládá svoje vajíčka do lýka stromů. V chladnějším klimatu se urodí pouze jedna generace kůrovců ročně, při příznivých podmínkách se urodí dvě až tři generace kůrovců. Larvy se po vylíhnutí živí vodivými pletivy stromu, čímž zabraňují transportu živin a vody. To způsobuje vodní stres stromu a případně jeho uschnutí. Pro zahubení jednoho stromu může stačit i 200 lýkožroutů (Christiansen, 1985), naopak v jednom stromě se může urodit za příznivých podmínek 300 – 400 tisíc brouků. Tato čísla se však u jednotlivých autorů liší, závisí zde na konkrétních podmínkách a stavu porostů (Skuhravý, 2002). Obranaschopnost stromu je založena na produkci pryskyřic a schopnosti transportu sacharidů do napadených částí.

První generace dospělých jedinců v roce může vylétat v červnu, následná v červenci.

Na plochách, kde došlo k odumření stromů vlivem kůrovce, může prosvětlením dojít ke zvýšení obranaschopnosti zbylých stromů, neboť se zvýší jejich asimilační schopnost. Roli zde hrají i abiotické faktory (voda, živiny, CO₂) (Waring & Running, 1998).

6. Vývoj rozšíření lýkožrouta v oblasti centrální Šumavy

Za původ posledního kalamitního přemnožení lýkožrouta smrkového na Šumavě lze považovat roky 1983 a 1984, ve kterých došlo vlivem vichřic v NP Bavorský les v Německu k polomům o rozloze 173 ha (Heurich et al., 2001; Skuhravý, 2002). Stromy

z plochy 85 ha byly zpracovány. Na zývající ploše 88 ha se tehdy správa NP Bavorský les rozhodla nezpracovávat ležící kmeny a ponechat další vývoj přirozeným přírodním procesům. Nezpracované ležící kmeny poskytly dobré podmínky pro vývoj lýkožroutů, které pak v roce 1986 napadli i živé stromy. Přes následné polomy v roce 1990 (způsobených orkány Vivian a Veibke) se rozsah kalamity od roku 1988 do 1992 nezvýšil. To vedlo k optimistickému názoru bavorských pracovníků, že kalamita lýkožrouta smrkového končí (Skuhravý, 2002). V roce 1993 však začal prudce stoupat podíl napadených ploch. Největšího rozvoje dosáhlo šíření severozápadně od Luzného směrem k Velkému a Malému Špičnicku a odtud dále na sever severovýchod a východ.

K akceleraci rozpadu smrčín vlivem lýkožrouta došlo v roce 1995, kdy plocha rozpadlých smrčín v NP Bavorský les v jednom roce poprvé přesáhla 200 ha a výsledný úbytek činil 367 ha. V následném roce 1996 se roční úbytek zvýšil více než dvojnásobně (827 ha). V tomto roce došlo k nejvyššímu úbytku lesa v NP Bavorský les za období 1988-2000. V letech 1997-2000 se pohybovaly roční ztráty lesních porostů vlivem lýkožrouta v rozsahu 400-600 ha. V roce 2001 bylo zpracováním leteckých snímků zjištěno pouze 55 ha nových rozpadlých smrčín (Heurich et al., 2001, Heurich & Martin, 2002).

Na české straně jsou na leteckých snímcích z roku 1992 v oblasti mezi Špičnickem, Blatným vrchem směrem k Roklanu patrné jednotlivé napadené stromy a ve 12 případech i větší ohniska (15 – 20 stromů) (Skuhravý, 2002). Následovalo šíření kůrovce, projevující se zejména vznikem ohnisek a rozsevem v zapojeném porostu.



Obr. 3 Hranice mezi bezzásahovou zónou (horní část) a zónou se zásahovým managementem (spodní část). Hranicí je silnice spojující Březník a Roklanskou hájenku. (Stav z roku 2002, Foto

M. Hais)

V roce 1995 byla správou NP Šumava vyhlášena a v roce 1997 rozšířena bezzásahová zóna na jih od silnice mezi Roklanskou hájenkou a Březníkem (obr. 3) o celkové rozloze 1450 ha. Maxima napadení bylo dosaženo roku 1996, kdy se napadení rozšířilo na 80% celkové plochy. Vně této zóny přijala správa NP Šumava opatření sanace dřevní hmoty za účelem zastavení dalšího postupu kůrovce. Zde je 10 % sanovaných stromů odkorněno a ponecháno na místě. Na vzniklých holinách se v rozsáhlé míře od roku 1996 zalesňuje a kromě smrku se zde vysazují i příměsné dřeviny: jeřáb, buk, jedle a klen. Důležitost dosazování příměsných dřevin na holinách pro přiblížení následné generace lesa přirozenému stavu zmiňují Zatloukal a kol. (2001). Celkové následky kůrovcové kalamity do roku 2002 ukazuje tabulka 1. Stav rozpadu smrkových porostů v roce 2007 v oblasti Luzenského údolí ukazuje obrázek 4.

Národní park	Mrtvý les (ha)	Holiny (ha)	Rozsah v mil. m ³
NP Bavorský les	3650	270	1,5 – 1,7
NP Šumava	1450	1150	1,1 – 1,3
Celkem	5100	1420	2,6 – 3,0

Tab. 1 Plocha mrtvého lesa a holin v NP Bavorský les a NP Šumava (převzato z knihy Kůrovec a jeho kalamity, Skuhřavý, 2002).



Obr. 4 Rozpadlé porosty smrku vlivem lýkožrouta smrkového v okolí Březnické myslivny. Pohled z vrcholu Luzného (Stav z roku 2007, Foto M. Hais)

7. Obnova lesů v rozpadlých smrčinách a na holých sečích

Obnova lesů zahrnuje přirozenou regeneraci v rozpadlých smrčinách i umělou výsadbu dřevin v oblastech zásahového managementu parků NP Šumava i Bavorský les. Ze srovnání Jonášové a Pracha (2004) v NP Šumava vyplývá, že vývoj počtů semenáčků (přirozeného zmlazení) v rozpadlých smrčinách je vyšší než na holých sečích. Navíc v rozpadlých porostech smrku se utváří různorodá věková struktura regenerujícího porostu (obr. 5)

Výsledky úspěšného zmlazení v rozpadlých smrčinách potvrzuje výzkum v NP Bavorský les. Toto zmlazení činilo po inventurách v roce 1996 již 1 698 ks/ha (z toho 1 084 ks > 20 cm) a do roku 2002 vzrostlo na 4 571 ks/ha (z toho 2 676 ks > 20 cm) (Jehl, 2005).

Výsledky Jonášové a Pracha (2004) rovněž ukazují, že vývoj přirozené obnovy na rozpadlých smrčinách povede mnohem dříve k horskému lesu s přirozenou druhovou skladbou než pomocí umělého dosazování dřevin na holých sečích. To je dáno tím, že v rozpadlých smrčinách se uplatnily druhy klimaxové smrčiny, zatímco na holých sečích se vyskytly i pionýrské a ruderální druhy.



Obr. 5 Přirozená obnova v rozpadlých smrkových porostech na svahu Velké Mokrůvky. (Stav z roku 2007, Foto M. Hais)

STRUKTURA PRÁCE

Podstatou této práce je využití družicových dat pro hodnocení a srovnání vývoje dvou typů disturbancí lesa (holých sečí a rozpadlých horských smrčín). Výsledky zpracování družicových dat jsou dále analyzovány v prostředí GIS společně s dalšími datovými vstupy (geodatabáze topografických dat, data získaná terénním průzkumem a mapováním). Další úrovní je statistické zpracování dat z analýz v prostředí GIS. Výsledky tohoto zpracování pak byly v některých případech opět použity pro následné analýzy v prostředí GIS, případně mohou být dalšími vstupy pro modely GIS. Celkovým výsledkem je pak kvantitativní vyjádření změn, které nastaly v důsledku odlesnění. Data těchto změn jsou pak vyjádřena v relativní (bezrozměrné hodnoty a indexy) nebo v absolutní škále.

Práce je členěna do kapitol, které představují jednotlivé publikace. Jejich řazení odpovídá genezi této práce, přičemž mezi publikacemi je obsahová návaznost. Názvy publikovaných prací nebo odeslaných manuskriptů jsou totožné s názvy kapitol (viz tabulka 2).

V první kapitole (*Changes in Land Cover Temperature and Humidity Parameters Resulting from Spruce Forests Decay in the Centre of the Šumava National Park*) jde o hodnocení spektrálního projevu odlesněných ploch a to rozpadlých smrčín i sanovaných porostů (holých sečí, holin) v oblasti centrální Šumavy pomocí termálních družicových dat, ale i pomocí indexu Tasseled Cap Wetness (TCW). Obě sledované charakteristiky jsem převedl do diskrétních tříd relativní škály a změny v čase jsem porovnával pomocí per-pixelové diferenční analýzy dvou termínů družicových scén Landsat TM/ETM+ z 11.7.1987 a 28.7.2002. Výhodou tohoto způsobu zjišťování rozdílů je, že při dostatečné přesnosti koregistrace dat jsou v čase srovnávány hodnoty identických pixelů. Výsledkem srovnání teplot byla identifikace teplotních změn a rozdílů v hodnotách TCW. Tento způsob hodnocení rozdílů má však omezení v tom, že aby bylo možné zachovat kvantilové rozpětí srovnávaných tříd, je počet tříd omezen. Tím se stírají rozdíly uvnitř těchto tříd a metoda ztrácí citlivost pro nepatrné rozdíly.

K odstranění výše zmíněného rozdílu jsem použil v druhé kapitole (*Vliv odlesnění a odumírání horských smrčín na teploty krajinného krytu a možné důsledky pro formování odtoku v oblasti centrální Šumavy*) standardizaci dat (Hendl, 2004). V této kapitole se jednalo o srovnání družicových dat ve stejných termínech jako v předchozí kapitole, avšak hodnoceny byly pouze rozdíly teplot krajinného krytu.

Č.	Publikace, které jsou součástí disertační práce	Autoři	rok	zdroj	status	stav	% podíl autora DP
1	Changes in Land Cover Temperature and Humidity Parameters Resulting from Spruce Forests Decay in the Centre of the Šumava National Park	M. Hais	2003	AUC	článek v recenzovaném časopise	P	100
2	Vliv odlesnění a odumírání horských smrčín na teploty krajinného krytu a možné důsledky pro formování odtoku v oblasti centrální Šumavy	M. Hais	2007	PZK	kapitola v monografii	P	100
3	The influence of topography on the forest surface temperature received from Landsat TM, ETM+ and ASTER thermal channels	M. Hais T. Kučera	2007	IJRS	článek ve vědeckém časopise	RR	70
4	Surface temperature change of spruce forest as a result of bark beetle attack: Remote sensing and GIS approach	M. Hais T. Kučera	2007	EJFR	článek ve vědeckém časopise	R	80
5	Surface temperature changes of spruce forest stands as a result of bark beetle outbreak	M. Hais T. Kučera	2007	FS	recenzovaný článek ve sborníku z konference	A	80
6	The multitemporal comparison of two types of forest disturbance using Landsat TM/ETM+ satellite scenes and field vegetation data	M. Hais, M. Jonášová J. Langhammer T. Kučera	2008	RSE	článek ve vědeckém časopise	O	60

Tab. 2 Seznam publikací, které jsou součástí disertační práce. Zkratky zdrojů: AUC - Acta Universitatis Carolinae Geographica, PZK – Povodně a změny v krajině, IJRS – International Journal of Remote Sensing, EJFR – European Journal of Forest Research, FS – FORESTSAT07, RSE - Remote Sensing of Environment; zkratky stavu: P – publikováno, R - v recenzním řízení, RR - v recenzním řízení (resubmise), A – přijato k publikaci, O – odesláno;

Využitím standardizace hodnot bylo možné detekovat i menší teplotní rozdíly a tak bylo možné srovnat jejich hodnoty na holých sečích a v rozpadlých smrčínách. Z výsledků vyplynulo, že v daném termínu nabývaly holé seče vyšších teplot oproti rozpadlým smrčínám. Nevýhodou srovnání dat použitých v obou přístupech bylo, že srovnání jak relativních tříd, tak standardizovaných hodnot neumožňuje kvantifikovat změny v absolutních jednotkách (např. u teplot ve °C). Dalším nedostatkem zmíněných přístupů je, že v závislosti na podmínkách počasí nemusí být zaručena stejná distribuce teplot krajinného krytu (různý termální stupeň, nelineární vztah mezi daty apod.).

Tyto nedostatky vedly ve třetí kapitole (*Comparison of surface temperature models using Landsat TM, ETM+ and Aster thermal channels*) k použití zcela odlišného přístupu k hodnocení teplotních změn v důsledku dvou typů odlesnění (holé seče a rozpadlé smrčiny). Kapitola je zaměřena metodicky a vychází z jednoduché úvahy: hodnoty teplot krajinného krytu z jedné družicové scény se použijí pro srovnání holých sečí a rozpadlých smrčín s hodnotami povrchových teplot živých lesů. Výsledné rozdíly na obou typech ploch se porovnají. Tato úvaha však vychází z předpokladu, že všechny srovnávané plochy mají stejnou energetickou bilanci. Protože tomu tak v případě zájmového území není, bylo nutné tento faktor zohlednit. Ve třetí kapitole je navrženo modelování teplot krajinného krytu na základě ročního období, denního času, nadmořské výšky, orientace a sklonu svahu. Tento navržený model byl testován na termálních datech družic Landsat ETM+, Landsat TM a TERRA ASTER s různým prostorovým (60, 90 a 120 m) a radiometrickým rozlišením (8 a 12 bitů). Výsledkem byl navržený model popisující závislost teplot v podmínkách měnící se topografie, a tím i odlišné energetické bilance.

Čtvrtá kapitola (*Surface temperature change of spruce forest as a result of bark beetle attack: Remote sensing and GIS approach*) je aplikací zmíněného modelu pro normalizaci teplotních dat a následnou kvantifikaci teplotních změn na hodnocených plochách. Výsledky tohoto hodnocení potvrzují nárůst teplot na odlesněných plochách popsaných v první kapitole i vyšší hodnoty teplot na holých sečích oproti rozpadlým smrčínám. Navíc bylo možné tyto změny vyjádřit v jednotkách °C.

V páté kapitole (*Surface temperature changes of spruce forest stands as a result of bark beetle outbreak*) je popsána aplikace zmíněného modelu pro popis průběhu teplotních rozdílů ve třech časových termínech (11.7.1987, 11.7.1995, 28.7.2002). Výsledky tohoto multitemporálního srovnání korespondují s postupným odlesněním zájmového území, ve kterém během letních měsíců postupně vzrůstaly teploty.

Šestá kapitola (*The influence of topography on the forest surface temperature received from Landsat TM, ETM+ and ASTER thermal channels*) se vrací k problematice popisu odlesnění pomocí spektrálních indexů, jako tomu bylo v první kapitole. V šesté kapitole je však použito více těchto indexů (navržen byl i jeden vlastní). Navíc vývoj časových změn je dokumentován na multitemporální analýze na základě 13 družicových scén Landsat TM/ETM+. Družicová data zde byla porovnávána s daty pozemního hodnocení vegetace (data pozemního mapování zpracovala M. Jonášová). Výsledky ukazují rozdílnou citlivost spektrálních indexů k odlesnění. Porovnání dvou typů dysturbancí lesa ukázalo odlišnou dynamiku odlesnění v případě rozpadu porostů smrku vlivem lýkožrouta a holých sečí.

Literatura:

- Ardö, J. (1992): Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing*. 13, 1779 – 1786.
- Asrar, G. (1989): Theory and applications of optical remote sensing. A Wiley-Interscience Publications. New York.
- Barry, R. G. (1992): Mountain Weather and Climate. 2nd ed. London, New York: Routledge.
- Becker, F., Li, Z. L. (1990): Towards a local split window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*. 11, 369-393.
- Bosfeld, F. C., Holtslag, A. A. M., Van den Hurk, B. J. J. M. (1999): Interpretation of Crown Radiation Temperatures of a Dense Douglas fir Forest with Similarity Theory. *Boundary-Layer Meteorology*. 92, 429–451.
- Bressee, M. K., Moine, J. L., Mather, S., Brosofske, K. D., Chen, J., Crow, T. R., Rademacher, J. (2004): Disturbance and landscape dynamics in the Chequamegon National Forest Wisconsin, USA, from 1972 to 2001. *Landscape Ecology*. 19, 291–309.
- Butera, M. K. (1986): A correlation and regression analysis of percent canopy closure versus TMS spectral response for selected forest sites in the San Juan National Forest, Colorado. I.E.E.E. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24, 122 – 129.
- Campbell, J.B. (2002): Introduction to Remote Sensing - third edition. Taylor and Francis, London.

- Cohen, W. B., Spies, T. A., & Fiorella, M. (1995): Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, USA. *International Journal of Remote Sensing*. 16, 721– 746.
- Cohen, W., Maersperger, T. K., Spies, T.T.A., Oetter, D.R. (2001): Modeling forest cover attributes as continuous variables in a regional context with Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*. 22, 2279-2310.
- Cohen, W. B., Spies, T. A., Alig, R. J., Oetter, D. R., Maersperger, T. K., Fiorella, M. (2002): Characterizing 23 years (1972–1995) of stand-replacing disturbance in western Oregon forest with Landsat imagery. *Ecosystems*. 5, 122-137.
- Collins, J. B., and Woodcock, C. E. (1996), An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*. 56, 66–77.
- Coppin, P. R., Bauer, M. E. (1996): Change detection in forest ecosystems with remote sensing digital imagery. *Remote Sensing Reviews*. 13, 207-234.
- Crist, E. P. Cicone, R. C. (1984): A physically-based transformation of Thematic Mapper data - the TM Tasseled Cap, *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*. GE-22, 256-263.
- Dobrovolný, P. (1998): Dálkový průzkum Země, digitální zpracování obrazu. Scriptum. Brno.
- Forman, R. T. T., Godron, M. (1986): Landscape ecology. John Wiley and Sons. New York.
- Franklin, S. E., Bowers, W. W., Ghitter, G. (1995): Discrimination of adelgid-damage on single balsam fir trees with areal remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*. 16, 2779-2794.
- Franklin, S. E. (2001): Remote Sensing for Sustainable Forest Management, CRC Press (Lewis), Boca Raton, FL.
- Franklin, J., Phinn, S. R., Woodcock, C. E., Rogan, J. (2003): Rationale and conceptual framework for classification approaches to assess forest resources and properties. pp. 279-300. In: Wulder, M. A. & Franklin, S. E. (Eds.): Remote Sensing of Forest Environments, Concepts and Case Studies. Kluwer Academic Publishers.
- Fraser, R. H., Li, Z., Cihlar, J. (2000): Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): A New Technique for Burned Area Mapping over Boreal Forest. *Remote Sensing of Environment*. 74, 362 – 376.

- Funke, W., Petershagen, M. (1994): Zur Flugaktivität von Borkenkäfern. Jahresber. Naturw. Ver. Wuppertal 47, 5–10 In: Wermelinger, B. (2004): Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* - a review of recent research. *Forest Ecology and Management*. 202, 67–82.
- Gao, B. C. (1996): NDWI – A normalised difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 58, 257 – 256.
- Geiger, R. (1965): The climate near the ground. Harvard Univ. Press, Harvard. Geiger, R., Aron, R. H., Todhunter, P. (2003): The climate near the ground. Sixth edition. Rowman & Littlefield Publishers, Inc., Langham etc.
- Goward, S., Williams, D. (1997): Landsat and earth system science: development of terrestrial monitoring. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 63, 887–900.
- Guyot, G., Riom, J. (1988): Review of factors affecting remote sensing of forest decline. Proceedings-Seminar on Remote Sensing of Forest Decline Attributed to Air Pollution, April 1987, Laxenburg, Austria.
- Hall, R. J., Kruger, A. R., Scheffer, J., Titus, S. J., Moore, W. C. (1989): A statistical evaluation of Landsat TM and MSS for mapping forest cutovers. *Forest Chronicle*. 65, 441-449.
- Hall, R. J., Skaun, R. S., Arsenault, E. J. (2007): Remote sensed data in the mapping of the insect defoliation. 86-111. In Wulder, M. A., S. E. Franklin, (eds.) *Understanding Forest Disturbance and Spatial Pattern: Remote Sensing and GIS Approaches*, CRC Press (Taylor and Francis), Boca Raton, FL.
- Hansen, M. J., Franklin, S.E., Woudsma, C., Peterson, M. (2001): Forest Structure Classification in the North Columbia Mountains Using the Landsat TM Tasseled Cap Wetness Component. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 27 (1), 20-31.
- Hardisky, M. A., Klemans, V., Smart, R. M. (1983): The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 49, 77-83.
- Hashimoto, S., Suzuki, M. (2004): The impact of forest clear-cutting on soil temperature: a comparison between before and after cutting, and between clear-cut and control sites. *Journal of Forest Research*. 9, 125–132.
- Healey, S. P., Cohen, W. B., Yang, Z., Krankina, O. N. (2005): Comparison of tasseled cap-based Landsat datastructures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*. 97, 301-310.

- Healey, S.P., Yang, Z., Cohen, W. B., Pierce, D. J. (2006): Application of two regression-based methods to estimate the effects of partial harvest on forest structure using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. 101, 115-126.
- Hendl, J. (2004): Přehled statistických metod zpracování dat. Analýza a metaanalýza dat. Portál.
- Heurich, M., Reinelt, A., Fahse, L. (2001): Die Buchdrucker Massenvermehrung im Nationalpark Bayerischer Wald. 9 – 48. In: Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald: Waldentwicklung im Bergwald nach Windwurf und Borkenkäferbefall. Bayerische Staatsforstverwaltung.
- Heurich, M., Martin, K. (2002): Luftbilddauswertung zur Waldentwicklung im Nationalpark Bayerischer Wald 2001 - Ein neues Verfahren und seine Ergebnisse zur Totholzflächenkartierung. 1-25. Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald.
- Horne, J.H. (2003): A Tasseled Cap transformation for IKONOS images. ASPRS Annual Conference Proceedings. Anchorage, Alaska.
- Houghton, R. A. (1993): Is carbon accumulating in the northern temperate zone? *Global Biogeochem Cycles*. 7, 611–7.
- Horler, D. N. H., Dockray, M. , Baringer, A. R. (1983): Red edge measurement for remotely sensing plant chlorophyll content. *Advances in Space Research*, 3 (2), 273 – 277.
- Horler, D. N. H., & Ahern, F. J. (1986): Forestry information content of Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*. 7, 405– 428.
- Christiansen, E. (1985): Ips/Ceratocystis – infection of Norway spruce. What is deadly dosage? *Z. Angew. Ent.* 99: 6 – 11. In: Skuhrový, V. (2002): Lýkožrout smrkový (*Ips typographus* L.) a jeho kalamity. Der Buchdrucker und seine Kalamitäten. Agrospoj, Praha.
- Christiansen, E., Waring, R.H., Berryman, A. A. (1987): Resistance of conifers to bark beetle attack: Searching for general relationships. *Forest Ecology and Management*. 22, 89-106.
- Iverson, L. R., Graham, R. L., Cook, E. A. (1989): Applications of satellite remote sensing to forested ecosystems. *Landscape Ecology*. 3, 131-143.
- Jehl, H. (2005): Naturwälder im Nationalpark Bayerischer Wald und deren ungestörte Waldentwicklung. Půirozené lesy v NP Bavorský les a jejich nerušený vývoj. In: Hubený (Ed.) Přírodě blízké lesnictví na bázi přírodních procesů – cesta

k udržitelným lesům. Naturnahe Forstwirtschaft auf Basis der natürlichen Prozesse – ein Weg zu nachhaltigen Wäldern. Seminář 16. – 17. 6. 2005.

Jensen, J.R. (2000): *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, Upper Saddle River: Prentice-Hall.

Jin, S., Sader, S. A. (2005): Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*. 94, 364-372.

Jonášová, M., Prach, K. (2004): Central-European mountain spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forests: regeneration of tree species after a bark beetle outbreak. *Ecological Engineering*. 23, 15–27.

Kauth, R. J., Thomas, G.S. (1976): Tasseled Cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. Proceeding from Remotely Sensed Data Symposium, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. P. 4b41-4b51.

Kennedy, R. E., Cohen, W. B., Schroeder, T. A. (2007): Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics. *Remote Sensing of Environment*. 110, 370-386.

Khorrarn, S., Biging, G. S., Chrisman, N. R., Colby, D. R., Congalton, R.G., Dobson, J. E., Ferguson, R. L., Jensen, J. R. and Mace, T. H. (1994): Accuracy Assessment of Land Cover Change Detection. Computer Graphics Center, Raleigh, North Carolina.

Klassen, W., van Breugel, P. B., Moors, E. J., Nieveen, J. P. (2002): Increased heat fluxes near a forest edge. *Theoretical and Applied Climatology*. 72, 231 – 243.

Kuzera, K., Rogan, J., Eastman, J. R. (2005): Monitoring vegetation regeneration and deforestation using change vector analysis: Mt. St. Helens study area. ASPRS Annual Conference, Baltimore, Maryland.

Lambert, N. J., Ardö, J., Rock, B. N., Vogelmann, J. E. (1995): Spectral characterization and regression-based classification of forest damage in Norway spruce forest stands in the Czech Republic using Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*. 16, 1261-1287.

Lambin, E. F., Strahler, A. H. (1994): Change-Vector Analysis in Multitemporal Space: A Tool To Detect and Categorize Land-Cover Change Processes Using High Temporal-Resolution Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*. 48, 231 – 244.

- Leckie, D. G. Gougeon, F. A. (1981): Assessment of spruce budworm defoliation using digital airborne MSS data. *Proceedings of the Seventh Canadian Symposium on Remote Sensing*. Winnipeg, Manitoba. 190-196.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W. (2004): *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons. New York.
- Linke, J., Betts, M. G., Lavigne, M. B., Franklin, S. E. (2007): Introduction: Structure, Function, and Change of Forest Landscapes. 1-29. In Wulder, M. A., S. E. Franklin, (eds.) *Understanding Forest Disturbance and Spatial Pattern: Remote Sensing and GIS Approaches*, CRC Press (Taylor and Francis), Boca Raton, FL, 252.
- Lobser, S. E, Cohen, S. E. (2007): MODIS tasselled cap: land cover characteristics expressed through transformed MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*. 28 (22), 5079-5101.
- Löw, J., Míchal, I. (2003): Krajinný ráz. Lesnická práce. Kostelec nad Černými lesy.
- MacLeond, R. B., Congalton, R. G. (1998): A quantitative comparison of change detection algorithms for monitoring eelgrass from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 64, 207–216.
- Malenovský, Z. (2006): Quantitative remote sensing of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.): Spectroscopy from needles to crowns to canopies. PhD Thesis, Wageningen University, The Netherlands.
- Masek, G. J. (2005). LEDAPS Disturbance index: Algorithm Description v.1. Algorithm Description for LEDAPS disturbance products.
<http://ledaps.nascom.nasa.gov/ledaps/docs1.html>
- Muchoney, D. M., Haack (1994): Change detection for monitoring forest defoliation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60, 1243-1251.
- Netherer, S., Nopp-Mayr, U. (2005): Predisposition assessment systems (PAS) as supportive tools in forest management-rating of site and stand-related hazards of bark beetle infestation in the High Tatra Mountains as an example for system application and verification. *Forest Ecology and Management*. 207, 99-107.
- Oliver, C. D., Larson, B.C. (1996): *Forest stand dynamics*. John Wiley & Sons, New York.
- Petrík, M., Havlíček, V., Uhrecký, I. (1986): *Lesnícka bioklimatológia. Príroda*. Bratislava.
- Pickett, S.T.A. and White, P.S. (1985): *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, Inc., New York.
- Pierce, K. B., jun., Lookingbill, T., Urban D. (2005): A simple method for estimating potential relative radiation (PRR) for landscape-scale vegetation analysis. *Landscape Ecology*. 20, 137–147.

- Pokorný, J., (2001): Dissipation of solar energy in landscape-controlled by management of water and vegetation. *Renewable energy*. 24, 641 – 645.
- Pozo, D., Olomo, F. J., Alados-Arboledas, L. (1997): Fire Detection and Growth Monitoring Using a Multitemporal Technique on AVHRR Mid-Infrared and Thermal Channels. *Remote Sensing of Environment*. 60, 111-120.
- Quattrochi, D. A., Luvall, J. C. (1999): Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications. *Landscape Ecology*. 14, 577–598.
- Quattrochi, D. A., Luvall, J. C. (2004): Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes. CRC Press, London.
- Rock, B. N., Williams, D. L., Vogelmann, J. E. (1985): Field and airborne spectral characterization of suspected acid deposition damage in red spruce (*Picea rubens*) from Vermont. 71 – 81. Preceedings of the 11th Tnternational Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University, West Lafayette, IN.
- Rock, B. N., Vogelmann, J. E., Williams, D. L., Vogelmann, A. F., Hoshizaki, T. (1986): Remote detection of forest Damage. Plant responses to stress may have spectral “signatures” that could be used to map, monitor and measure forest damage. *Bioscience*. 36, 439 – 445.
- Running, S. W., Peterson, D. L., Spanner, M. A., Teuber, K. B. (1986): Remote sensing of coniferous forest leaf area. *Ecology*. 1, 273-276.
- Rykiel, E. J., Coulson, R. N., Sharpe, P. J. H., Allen, T. F. H., Flamm, R. O. (1988): Disturbance propagation by bark beetles as an episodic landscape phenomenon. *Landscape Ecology*. 1 (3), 129 – 139.
- Saunders, S. C., Chen, J., Drummer, T. D. Crow, T. R. (1999): Modeling temperature across edges over time in a managed landscape. *Forest Ecology and Management*. 117, 17–31.
- Shvidenko, A., Apps, M. (2006): The international boreal forest research association: understanding boreal forests and forestry in a changing world. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 11, 5–32.
- Skuhrový, V. (2002): Lýkožrout smrkový (*Ips typographus* L.) a jeho kalamity. Der Buchdrucker und seine Kalamitäten. Agrospoj, Praha.
- Stone, T. A., Woodwell, G. M. (1988): Shuttle imaging radar analysis of land use in Amazonia. *International Journal of Remote Sensing*. 9, 95 – 105.

- Uunila, L., Guy, B., Pike, R. (2006): Hydrologic effect of Mountain Pine Beetle in the Interior Pine Forests of British Columbia: Key questions and current knowledge. *Streamline, Watershed Management Bulletin*. 9 (2), 1-7.
- Waring, R.H., Running, S.W. (1998): *Forest ecosystems: Concept and management*. Academic press, San Diego, CA.
- Wilson, E. H., Sader, S. A. (2002): Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*. 80, 385-396.
- Wulder, M. A., Skakun, R. S., Kurz, W. A., White, J. C. (2004): Estimating time since forest harvest using segmented Landsat ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*. 93, 179–187.
- Wulder, M. A., White, J. C., Bentz, B., Alvarez, M. F., Coops, N. C. (2006a): Estimating the probability of mountain pine beetle red-attack damage. *Remote Sensing of Environment*. 101, 150-166.
- Wulder, M. A., Dymond, C. C., White, J. C., Leckie, D. G., Carrol, A. L. (2006b): Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities. *Forest Ecology and Management*. 221, 27–41.
- Wulder, M. A., S. E. Franklin, (2003): *Remote Sensing of Forest Environments, Concepts and Case Studies*. Kluwer Academic Publisher.
- Wulder, M. A., S. E. Franklin, (2007): *Understanding Forest Disturbance and Spatial Pattern: Remote Sensing and GIS Approaches*, CRC Press (Taylor and Francis), Boca Raton, FL.
- Yoshino M. M., (1975): *Climate in a small area. An introduction to local meteorology*. Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- Zatloukal, V., Kadera, J., Černá, j., Přílepková, S., (2001): Předběžné vyhodnocení stavu a vývoje přirozené obnovy v NP Šumava v prostoru Mokrůvka – Špičnická hájenka. *Aktuality šumavského výzkumu*. 110-115.